

地上設置型太陽電池アレイの空力特性に対する風向角の影響

Influence of wind direction on aerodynamic characteristics of multiple arranged photovoltaic arrays

- 伊藤靖晃, 清水建設(株), 東京都江東区越中島三丁目 4 番 17 号, E-mail: yasuaki.ito@shimz.co.jp
- 野澤剛二郎, 清水建設(株), 東京都江東区越中島三丁目 4 番 17 号, E-mail: nozawa@shimz.co.jp
- Yasuaki Ito, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima Koto-ku, Tokyo, Japan
- Kojiro Nozawa, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima Koto-ku, Tokyo, Japan

The aerodynamic characteristics of multiple arranged photovoltaic arrays are investigated in terms of wind direction and inflow turbulence using CFD by comparison with wind tunnel test. Conical vortices are strongly generated only in the smooth flow when wind direction is inclined by 30 degrees with the North. Conical vortices cause low pressure area on upper surfaces of photovoltaic arrays, then wind pressure coefficient comes up by comparison with in the turbulent flow. The wind pressure coefficients around array end are partly higher than that set under Japanese Industrial Standards code (JIS) because JIS is based on 7.5m average wind pressure coefficient.

1. はじめに

近年、環境負荷低減のため自然エネルギーの導入が積極的に進められている。中でも太陽光発電は、設置場所の制限が少なく、屋間の電力需要ピークを緩和できるため、大規模太陽光発電所(メガソーラー)の建設や一般住宅屋根への太陽光発電システムの導入が広がっている。メガソーラーでは太陽電池アレイ(以下、アレイと呼ぶ)に作用する風荷重が主要な荷重となる場合が多く、風荷重の評価が構造物の健全性や建設コストに大きく反映される。モジュール面の風力係数は、JIS C8955:2004「太陽電池アレイ用支持物設計標準¹⁾」(以下、JIS規格と呼ぶ)に規定されているアレイ傾斜角度が15度から45度の場合の風力係数の近似式が用いられている。JIS規格は、NEDOの「太陽光発電システム実用化技術開発²⁾」の中で行われた風洞実験結果に基づいて作成されたものであり、アレイ間隔やアレイ高さなどについては検討されておらず、様々な配置のアレイの風力係数について合理的な検討が行われているとは言えない。また、JIS規格には「架台が複数の場合には、周囲端部お近似式の値を、中央部お近似式の1/2を使用してもよい。」と規定されているが、中央部の定義が明確ではなく、中央部を規定するためには別途検討を要する。そこで本報告では、地上設置型太陽電池アレイの風荷重評価を合理的に行うことを目的として、風向角および流入気流に着目し、NEDOの風洞実験と同一形状のアレイを対象にアレイの空力特性の検討を行った。

2. 検討条件と数値計算法

本検討ではNEDOの風洞実験と同一形状(Fig. 1, Table 1)のアレイ群を対象にTable 2の3ケースについて検討を行った。なお、NEDOの風洞実験報告書には用いた気流が記載されていないため、Case2およびCase3において一様流および粗度区分Ⅲの勾配流を用いて気流特性の影響について検討した。また、同報告書にはアレイ厚さが記載されていないため、本検討ではフルスケールで

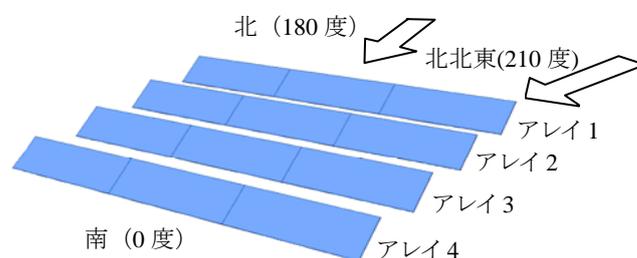


Fig.1 overview of arrays

Table2 analysis condition

ケース名	風向	流入気流
Case1	180度(北)	一様流
Case2	210度(北北東)	一様流
Case3	210度(北北東)	勾配流(粗度区分Ⅲ)

50mmとした。アレイ長さが2300mmと大きいため、アレイ厚さが解析結果に与える影響は小さいと考えられる。

基礎方程式は3次元非圧縮性Navier-Stokes方程式で、標準k-εモデルを用いて有限体積法により定常計算を行った。空間微分は移流項にはQUICK、拡散項には2次精度中心差分を、収束計算にはSIMPLE法を用いた。モジュール面の壁面境界条件は、粗度長さ Z_0 を含む対数法則とした。また、床面の境界条件はCase1およびCase2では Z_0 を含む対数法則としたが、Case3では勾配流の回復を防ぐため、壁面摩擦力を指定した。代表長さをアレイ厚さ(50mm)、代表風速を軒高風速とした場合のRe数は、Case1, Case2で 3.3×10^4 、Case3で 1.0×10^4 である。

Case3において流入風の平均風速 $u(z)$ 、風速変動の標準偏差 $\sigma_u(z)$ 、乱流エネルギー $k(z)$ 、エネルギー散逸率 $\epsilon(z)$ の算出には次式を用いた^{3),4),5)}。

$$u(z) = \begin{cases} u_G \left(\frac{z_b}{z_G}\right)^\alpha, & z < z_b \text{ (}\sigma_u\text{算出にのみ使用)} \\ u_G \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha, & z < z_G \\ u_G, & z \geq z_G \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_u(z) = u(z) \times \begin{cases} 0.1 \left(\frac{z}{z_G}\right)^{-0.05-\alpha} \left(1 - 0.7 \frac{z_b}{z_G}\right)^{0.25}, & z < z_b \\ 0.1 \left(\frac{z}{z_G}\right)^{-0.05-\alpha} \left(1 - 0.7 \frac{z_b}{z_G}\right)^{0.25}, & z_b \leq z < z_G \\ I_G, & z \geq z_G \end{cases} \quad (2)$$

Table 1 feature size of arrays

アレイ数	南北4×東西3
アレイ長さ	2,300mm
アレイ幅	7,500mm
アレイ厚さ	50mm
設置高さ(底面)	500mm
アレイ勾配	30度
アレイ間隔	南北方向: 2,910mm 東西方向: 0mm

$$k(z) = \frac{\sigma_a^2(z)}{1.2} \quad (3)$$

$$\epsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k(z)^{3/2}}{l}, l = \min(k_z, k_{zG}) \quad (4)$$

$$z_b = 5, z_G = 450, \alpha = 0.20$$

3. 解析結果

NEDO の風洞実験報告書との比較のため、各アレイ(幅 7.5m)のモジュール面垂直方向の平均風力係数をケース毎に Table3 に示す。なお、基準風速は軒高風速とした。また、表中のアレイ番号は Fig.1 に示す様に定めている。

Table3 wind pressure coefficients of arrays

		西	中央	東
Case1	アレイ 1	-0.91	-0.95	-0.90
	アレイ 2	-0.17	-0.17	-0.17
	アレイ 3	-0.26	-0.18	-0.26
	アレイ 4	-0.31	-0.17	-0.31
Case2	アレイ 1	-0.58	-0.76	-1.28
	アレイ 2	-0.19	-0.47	-0.72
	アレイ 3	-0.26	-0.32	-0.60
	アレイ 4	-0.18	-0.34	-0.77
Case3	アレイ 1	-0.31	-0.56	-0.85
	アレイ 2	-0.07	-0.22	-0.57
	アレイ 3	-0.16	-0.26	-0.38
	アレイ 4	-0.24	-0.40	-0.41

NEDO の風洞実験では風向が 210 度のとき風力係数が最大で、周囲端部の風力係数が-1.06、中央部が-0.20 であった。本検討でも一様流で比べた場合、風向が 210 度の風力係数の絶対値が大きく、また中央部の風力係数が周囲端部より小さくなっており、風洞実験と定性的には一致する結果となった。ただし、風洞実験では中央部の風力係数が周囲端部の 20% 以下となっているのに対し、一様流を用いた Case2 では周囲端部の 40% 程度と風洞実験と比較して大きな値となった。これは風向角が 210 度のときにアレイ端部から生じる円錐渦の影響によるものと考えられる。Fig.2 に Case2 のアレイ上面圧力のコンターを各アレイの平均風力係数と併せて示すが、アレイ端部で生じる渦の流下に伴い、上面の圧力が局所的に低下し、風力係数の絶対値が大きくなっていることが確認できる。

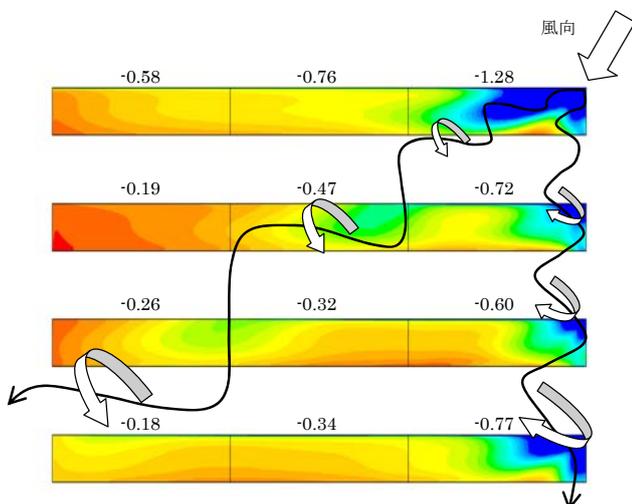


Fig.2 pressure contour of upper surface of arrays (Case2, smooth flow)

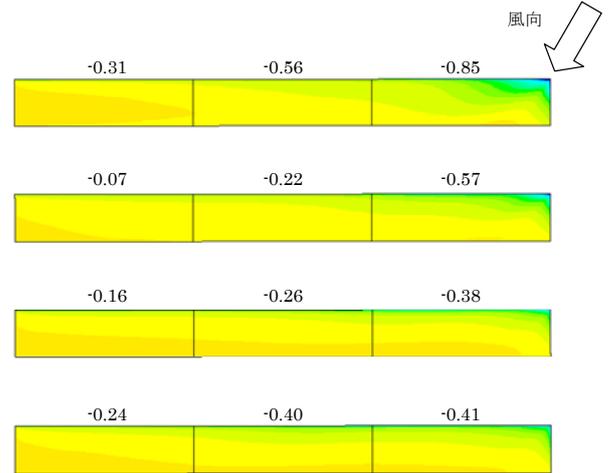


Fig.3 pressure countour of upper surface of arrays (Case3, gradient flow)

一方、勾配流を用いた Case3 では、円錐渦は生じておらず、Fig.3 に示すように表面圧力が局所的に低下する領域は存在しない。また、中央部の風力係数は周囲端部の 1/4 程度と風洞実験と近い傾向を示している。

太陽電池アレイを風洞実験や数値解析の対象とした場合、床面のごく近傍にモデルを設置する必要があり、一様流を用いた場合でもモデル位置まで境界層が発達する恐れがある。また、アレイ厚さがフルスケールで 50mm 程度であるため、風洞実験では模型の縮尺率を大きくする必要があり、勾配流を用いた場合にも風速のプロファイルまで合わせるのには困難である場合が多い。NEDO の風洞実験で用いた気流の特性は明らかではないが、比較的乱れの大きい気流下で行われ、円錐渦が発生しなかったため中央部の風力係数が大きく低減したと考えられる。風洞実験結果と数値解析結果が定量的に一致しないのも、流入風の特性の差異によるものと考えられる。

Fig.4 にアレイ長手方向(東西方向)の 1m 毎の空気力係数の分布を示す。一様流中では、アレイ 2 の端部から 9m の位置およびアレイ 3 の 16m の位置で円錐渦の影響によりピークが生じる。一方、勾配流中では一様流中のような明確なピークは生じず、アレイ端部からほぼ単調に風力係数の絶対値が低減する。JIS 規格では NEDO の風洞実験で測定された風力係数を基に、アレイ勾配が 30 度の場合の周囲端部の風力係数を-1.19 と定めているが、1 アレイ(7.5m)平均で算出した平均風力係数であるため、Fig.4 に示すようにアレイ端部付近では JIS 規格に定められた風力係数を局所的に上回る領域が存在する。このため、7.5m 未満の幅の架台を用いる場合には平均風力係数が JIS 規格に定められた値を上回る可能性があり、注意を要する。

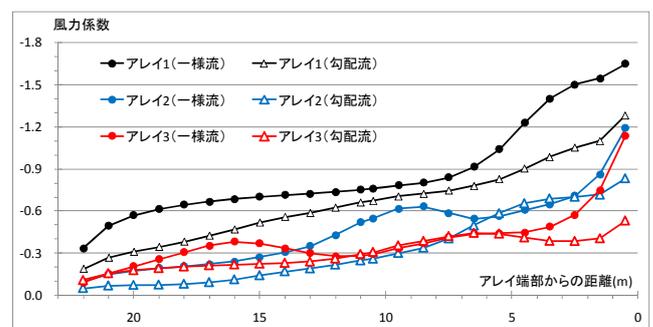


Fig.4 wind pressure coefficients of every 1m module

4. 結論

太陽電池アレイ架台の風荷重指針である JIS C 8955 の基となった NEDO の風洞実験と同一形状のアレイ群を対象に、数値流体解析により空力特性の検討を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- ・風向角が 210 度（北北東）の場合には、一様流中でアレイ端部から円錐渦が発生し、局所的に風力係数が大きくなる領域が存在した。中央部の風力係数は周囲端部の 40% 程度であった。
- ・勾配流中では円錐渦が発生しなかった。中央部の風力係数は周囲端部の 30% 程度と一様流中と比較して大きく低減した。
- ・アレイ端部付近では、局所的に風力係数が JIS 規格に定められた値を上回る可能性がある。
- ・風洞実験と同様、風力係数の絶対値は風向角が 180 度（北）の場合よりも 210 度（北北東）の方が大きな値となった。

参考文献

- (1) JIS C 8955, 太陽電池アレイ支持物設計標準, 2004
- (2) 株式会社関電工, 太陽光発電システム実用化技術開発「太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発 太陽電池架台の研究開発」, 平成 4 年度 NEDO 受託業務成果報告書, 1993
- (3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2004
- (4) 石原他, 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布 その 1 非台風時の強風, 日本風工学会誌, No.65, 1-15, 1995
- (5) Yamaguchi et al, Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. of Wind Eng. Indus. Aerodyn., Vol.91, 247-264, 2003